干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析

黄晨璐，　杨勤科

（西北大学城市与环境学院，陕西　西安　710127）

摘　要： 依据渭河和泾河流域1956—2016年实测水文资料、水利水保统计数据、TerraClimate年平均温度和Landsat地表反射率数据集，分析了流域水文要素、气温及植被覆盖度的历年变化规律，采用双累积值曲线法、累积距平法、有序聚类法、Lee-Heghinan法、秩和检验法等数理统计方法，确定了流域年径流量和年输沙量变化的突变年份，分析了降水和人类活动的减水减沙效应。结果表明：(1) 渭河和泾河流域历年降水量、径流量、输沙量、含沙量均呈显著减少趋势，渭河流域的降水和径流比泾河流域减少较多，泾河流域的泥沙比渭河流域减少较多。(2) 人类活动对2个流域径流泥沙量的影响均大于降水量对其的影响，且泾河流域受人类活动影响较渭河流域明显。(3) 2个流域的水沙特征差异性较大，渭河的年径流量、年径流深、径流系数是泾河流域的2.0~2.4倍，渭河的年输沙量、年输沙模数、年均含沙量仅是泾河流域的1/2~1/5。2个相邻流域水沙特征差异性较大的主要原因是，流域气温、降水等气候条件不同，植被覆盖度等下垫面条件存在差异，水利水保措施、水资源开发利用程度等人类活动的影响所致。

关 键 词： 径流；泥沙；减水减沙效应；渭河；泾河

文章编号：

2019年，黄河流域生态保护与发展成为了国家战略问题，中央提出解决黄河问题的关键在于对流域的治理[1]。随着区域水土保持措施的实施，黄河流域部分河流的径流泥沙发生了显著变化[2-5]。渭河是黄河流域的最大支流，近几十年来，流域内水土资源的时空分布发生显著变化，水土流失得到有效遏制，河流水环境明显改善[6-8]，然而区域水资源短缺、用水矛盾日益突出、局地生态环境恶化等问题依然存在。因此，分析气候变化和人类活动影响下渭河流域水沙变化规律，对区域水资源优化配置、调整水土流失治理格局、促进黄河流域生态保护具有十分重要的意义[9]。

鉴于渭河流域的重要性，研究者围绕渭河和泾河流域水沙变化展开了一系列研究。吴小宏等[10]利用张家山站实测径流泥沙资料，分析了泾河长时间序列水沙变化规律与归因；郑培龙等[11]对泾河流域水沙变化规律进行了研究，结果表明泾河流域水沙均呈显著下降趋势；胡安焱等[12]研究发现渭河流域水沙呈减少趋势，主要由人类活动和气候变化所影响；徐瑞瑞等[13]基于渭河流域32个水文站近60 a水沙数据，分析了渭河流域不同区间水沙变化特征及驱动因素，结果表明渭河流域大部分区间径流量和输沙量呈显著减少趋势，退耕还林还草、淤地坝建设、水库拦蓄等是渭河径流量和输沙量变化的主要原因。以上都是对渭河或者泾河流域水沙变化规律的研究，而对2个流域水沙变化的差异性进行系统全面的对照分析较少。为此，本文依据最新长时间序列实测水文数据，分析了渭河（泾河汇入前的咸阳水文站控制流域）与泾河流域历年水文要素的变化规律、降水与人类活动的减水减沙效应、水沙特征的差异性及其成因。

1　研究区概况

渭河发源于中国甘肃省渭源县的鸟鼠山，流经

收稿日期： 2020-04-14；　**修订日期：** 2020-11-11
基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项子课题（XDA20040202）资助
作者简介： 黄晨璐（1993-），女，在读博士研究生，研究方向为遥感与水土流失治理. E-mail: nwuhcl@163.com
通讯作者： 杨勤科（1962-），男，博士生导师，研究方向为区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析研究. E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

甘肃省、陕西省关中平原等地，至陕西省渭南市潼关县汇入黄河。流域全长818 km，总面积10.8×10^4 km^2。咸阳水文站为泾河汇入渭河干流前的控制站，距黄河口211.1 km，集水面积46827 km^2，占渭河全流域的43.4%。

泾河发源于中国宁夏六盘山，流经甘肃省，在陕西省高陵区汇入渭河。流域面积45421 km^2，全长483 km。年内径流变化大，夏季多洪水、泥沙，水土流失比较严重。流域多年平均气温8.6 ℃，年降水量在350~650 mm之间。张家山水文站为流域出口控制站，距渭河口58 km，集水面积43216 km^2，占渭河全流域的40.0%，年径流量15.66×10^8 m^3，年径流深36.2 mm，年输沙量2.064×10^8 t，年输沙模数4776 t·km^{-2}。

本文研究区域包括咸阳水文站以上渭河干流区域以及张家山水文站以上泾河区域，流域水系分布见图1。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用渭河与泾河流域历年实测水文资料、水利水保统计数据等进行分析，使用数据主要包括：(1) 渭河咸阳水文站、泾河张家山水文站1956—2016年实测径流与泥沙数据；(2) 流域内代表性雨量站33处，其中泾河流域13处，渭河流域20处，资料系列均为1956—2016年；(3) 1956—2016年流域水资源开发利用和水土保持措施统计资料；(4) 1958—2018年TerraClimate年平均温度数据；(5) 1987—2018年Landsat地表反射率数据集。

以上资料中，降水、径流、泥沙等历年水文资料为黄河水利委员会和甘肃水文部门实测并依据国家标准规范整编成果，数据完整且真实可靠；水土保持措施数据由水利部门提供，用2011年水利普查数据对个别异常值数据进行了修正；年平均温度与Landsat地表反射率均获取于Google Earth Engine[14]，其中温度获取于TerraClimate数据集[15]，是结合高分辨率WorldClim数据集与长时间序列CRUTs 4.0以及Japanese 55-year Reanalysis (JRA55) 插值生成的气候数据产品；Landsat地表反射率数据集(Landsat surface reflectance)[16]来自Landsat 5 ETM、Landsat 7 ETM + 和Landsat 8 OLI/TIRS传感器大气校正产品，数据集不仅包括计算植被指数NDVI的基本波段近红外波段(NIR)与红外波段(RED)，且提供了云、云阴影、冰雪、水体等辅助信息。

2.2 研究方法

采用双累积曲线法[17]分析了流域径流量、输沙量历年变化的突变点，并通过累积距平法、有序聚

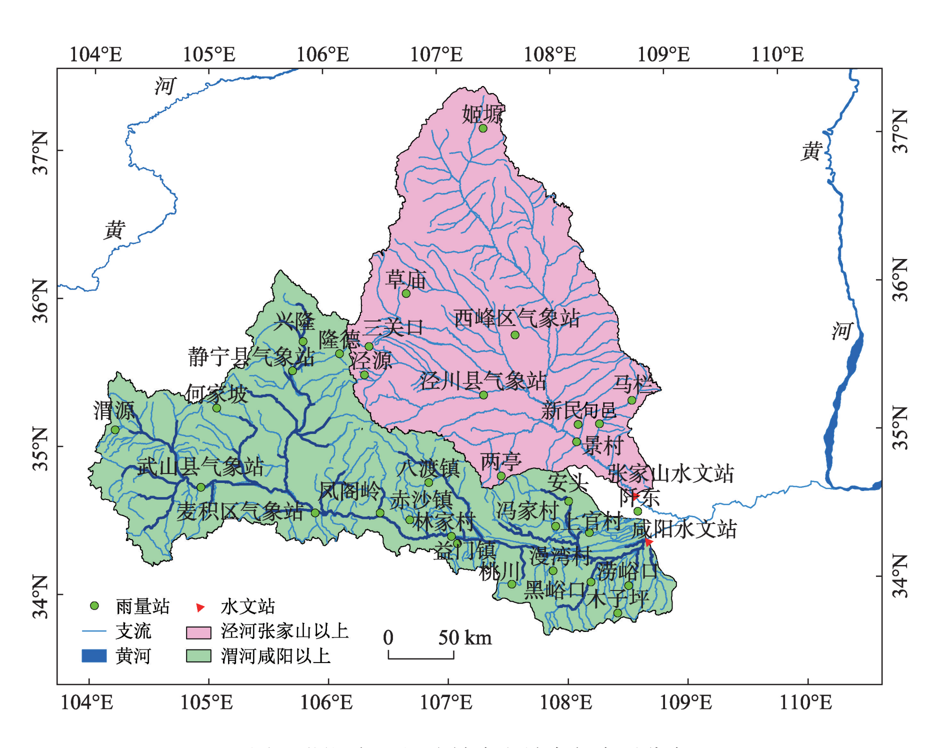


图1 渭河与泾河流域水文站点与水系分布

Fig. 1 Distribution hydrological sites and water system in Wei River and Jing River Basins

类法、Lee-Heghina法、秩和检验法等方法做了进一步检验分析，最终将时间序列划分为基准期和治理期；采用相关公式法，以转折前为基准期，分别建立基准期年径流量与年降水量、年输沙量与年降水量相关公式，将转折点后的年降水量代入公式，计算出天然条件下径流量、输沙量，与同期实测值之间的差值，作为人类活动的减水减沙量。治理期实测径流量和输沙量相对基准期实测值的减少量，主要包含两部分：一部分为降水减少引起的径流和输沙的减少量，一部分则是人类活动引起下垫面条件改变而使径流和输沙的减少量，人类活动的减水减沙量占2个时段实测值减少量的百分数，即为人类活动的减水减沙效应，用100%减去人类活动的减水减沙效应即为降水的减水减沙效应；基于Google Earth Engine平台，通过Landsat地表反射率数据集的近红外与红外波段计算生长季（4—9月）年最大NDVI，进而基于纯裸土像元与纯植被像元对应的NDVI估算流域1987—2016年植被覆盖度。具体计算流程见图2。

3 结果与分析

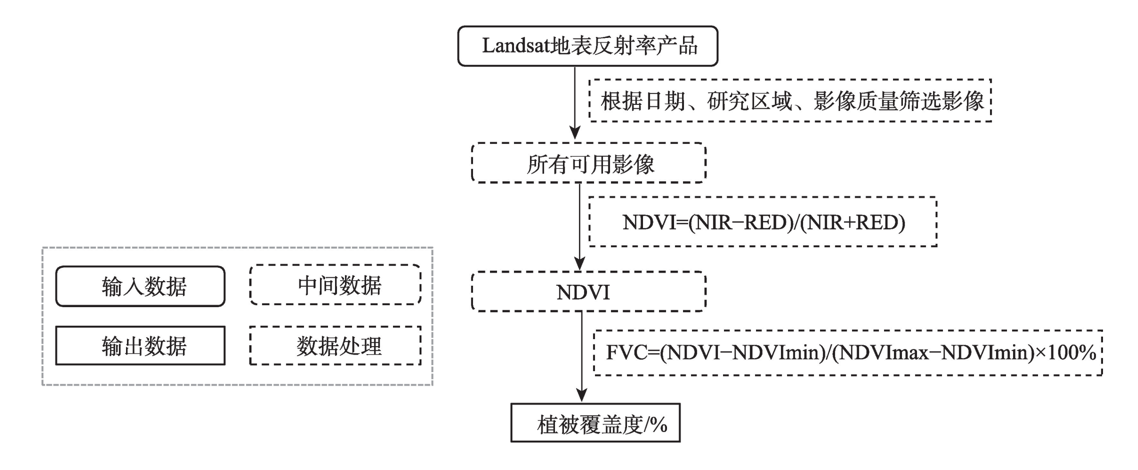
3.1 水文要素历年变化

图3为1956—2016年渭河与泾河流域降水量、径流量、输沙量、含沙量过程线。结果表明，各水文要素历年变化均呈减少趋势，其中渭河、泾河流域的多年平均降水量为609.2 mm和531.6 mm，分别减少1.41 $mm\cdot a^{-1}$、0.85 $mm\cdot a^{-1}$；多年平均径流量为38.08×10^8 m^3、15.66×10^8 m^3，分别减少0.711×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$、0.217×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$；多年平均输沙量为0.953×10^8 t、2.064×10^8 t，分别减少0.037×10^8 $t\cdot a^{-1}$、0.042×10^8 $t\cdot a^{-1}$；多年平均含沙量为25.0 $kg\cdot m^{-3}$、132.0 $kg\cdot m^{-3}$，分别减少0.586 $kg\cdot m^{-3}\cdot a^{-1}$、0.905 $kg\cdot m^{-3}\cdot a^{-1}$。渭河流域的降水和径流比泾河流域减少较多，约为2~3倍，主要是2个流域的气候变化和水资源开发利用程度不同所致；泾河流域的泥沙比渭河流域减少较多，其中年输沙量为1.1倍，年均含沙量为1.5倍，主要是泾河流域的植被覆盖度比渭河流域增加较快，1986—2018年泾河、渭河流域的植被覆盖度分别增加0.79%$\cdot a^{-1}$、0.71%$\cdot a^{-1}$。

3.2 水沙关系变化转折点分析

（1）双累积值曲线

绘制渭河与泾河流域控制站年径流量与流域年降水量、年输沙量与流域年降水量双累积值曲线（图4），其斜率代表单位降水量产生的径流量和输沙量的大小。渭河咸阳站年径流量与年降水量双累积值相关曲线分别在1970、1994年发生了明显转折（图4a），年输沙量与年降水量双累积值相关曲线分别在1973、1994年后连续两次发生明显转折（图4b）。泾河张家山站年径流量与年降水量、年输沙量与年降水量双累积值相关曲线均在1997年以后发生明显转折（图4c~d），其中年输沙量在1983—1985年发生较大变化，和其他年份降水主要集中在6—8月不同，这3 a流域的最大降水量主要集中在5、6月，水土侵蚀强烈，产生的泥沙相对较多，而1956—1982年、1986—1997年的斜率也基本相同，



注：NDVI为归一化植被指数；NIR与RED分别为近红与红外波段；FVC为植被覆盖度；NDVImax与NDVImin分别为纯植被像元与纯裸地像元对应的NDVI。

图2 植被覆盖度提取流程

Fig. 2 Flowchart of extraction of fractional vegetation coverage

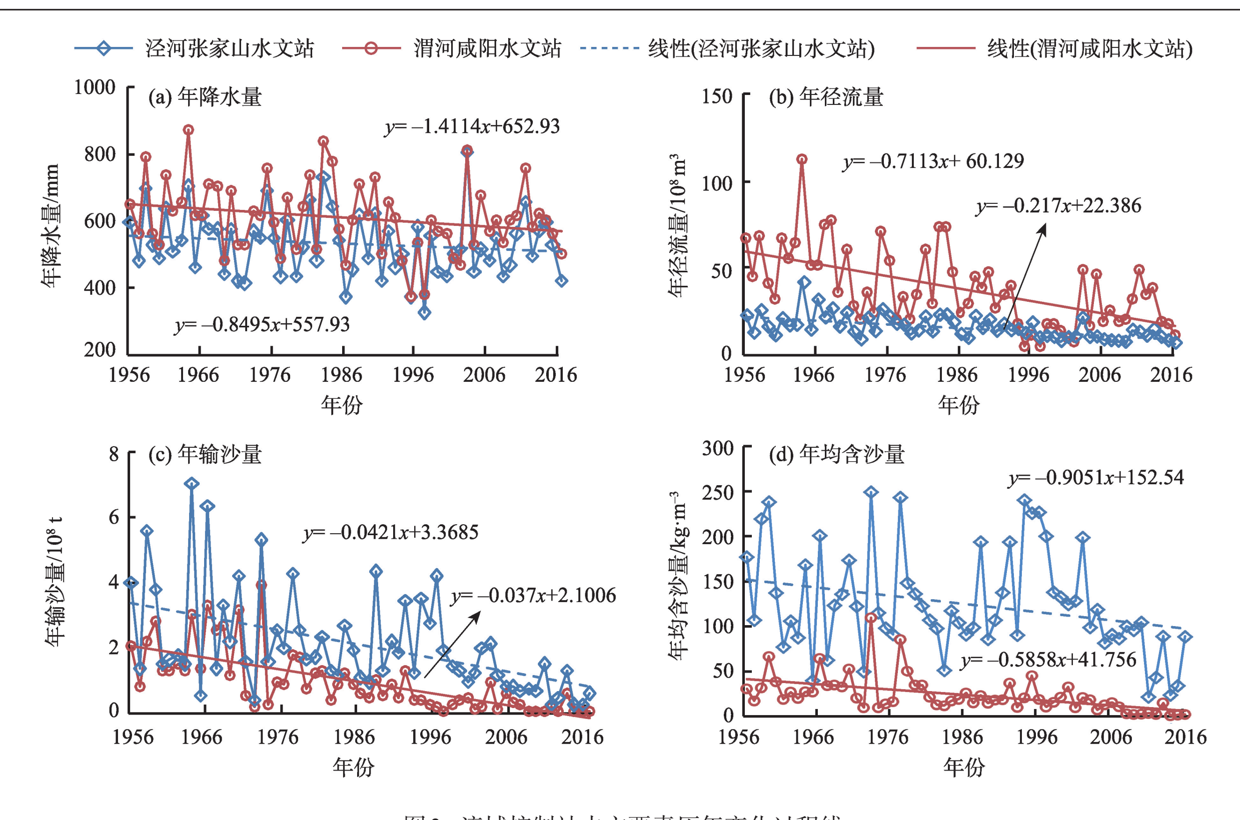


图3 流域控制站水文要素历年变化过程线

Fig. 3 Change curve of hydrological elements in the control station in the Wei River and Jing River Basins

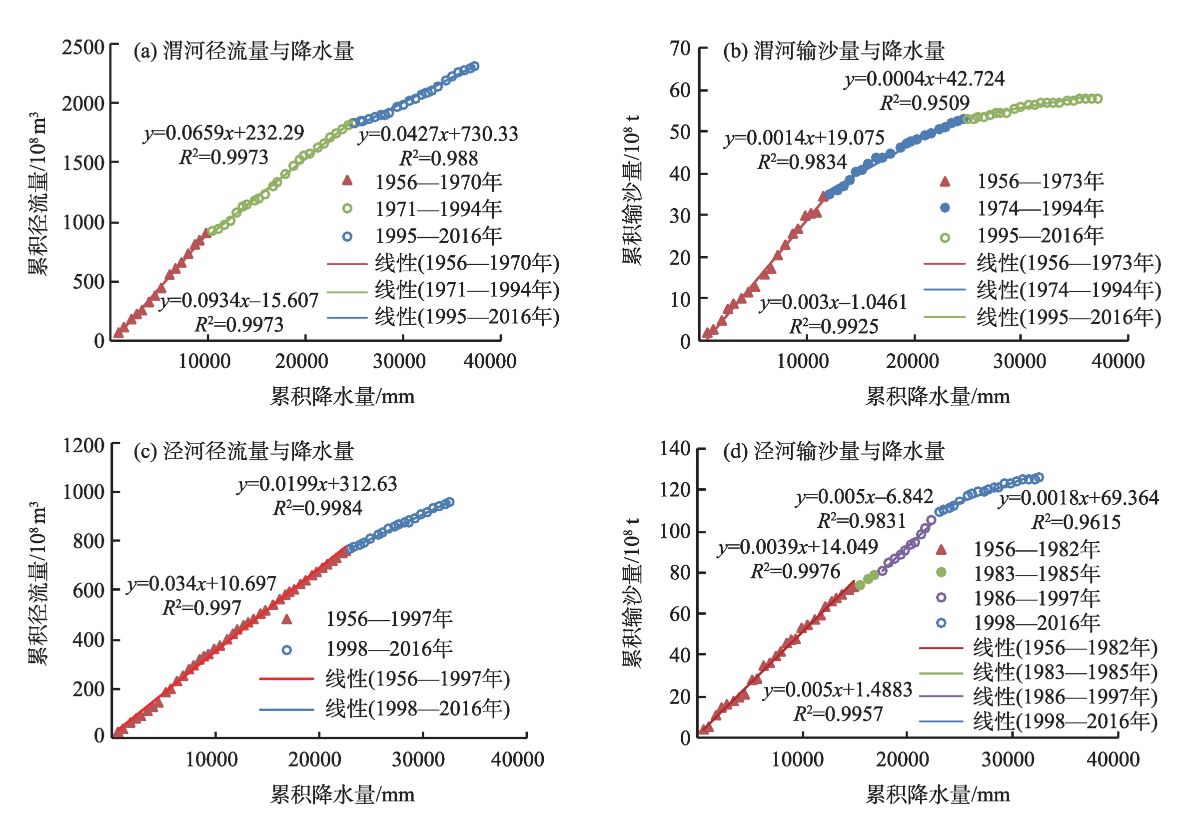


图4 渭河和泾河流域年径流量、年输沙量与年降水量双累积值曲线

Fig. 4 Double mass curves of annual runoff and precipitation, and annual sediment load and precipitation in Wei River and Jing River Basins

说明1956—1997年的下垫面条件是一致的。正是20世纪70年代大力兴修水利工程和水平梯田、90年代加大退耕还林还草力度等人类活动的影响，使渭河、泾河的水沙持续减少，而且泥沙减少强度较径流更为显著。

（2）突变点检验

表1是径流量、输沙量变化转折点的进一步检验分析，结果表明，突变点前后跳跃趋势均为显著（统计量均高于置信水平）。对照双累积曲线的转折点，最终确定咸阳站年径流量突变年份为1970、1994年，年输沙量突变年份为1973、1994年，张家山站年径流量、年输沙量突变年份均为1997年。2个流域突变年份的不一致主要是由水土保持措施实施力度的不同所致。20世纪70年代后，渭河流域工程措施（淤地坝与梯田）和林草措施（造林，种草以及封禁治理）的实施力度明显加大，而泾河流域水土保持措施在20世纪90年代后期才显著增加（图5）。

3.3 水沙关系及减水减沙效应

由流域年径流量与年降水量、年输沙量与年降水量的相关曲线（图6）以及人类活动减水减沙量（表2）可知，渭河咸阳水文站实测年径流量由基准期的60.16×10^8 m^{3}减少到措施期的38.67×10^8 m^3（1971—1994年）、22.38×10^8 m^3（1995—2016年），人类活动的减水效应为74.7%、67.1%，降水的减水效应为25.3%、32.9%；渭河咸阳水文站年输沙量由基准期的1.937×10^8 t减少到措施期的0.865×10^8 t（1974—1994年）、0.233×10^8 t（1995—2016年），人类活动的减沙效应为71.7%、64.4%，降水的减沙效应

表1 渭河与泾河流域突变点年份检验对照分析（α=0.05）

Tab. 1 Comparative analysis of abrupt points of Wei River and Jing River Basins

站名	水文要素	双累积曲线法	累积距平法 $T(\alpha/2)$=1.64 统计量|T|	累积距平法 是否显著	累积距平法 突变点	有序聚类法 $T(\alpha/2)$=1.64 统计量|T|	有序聚类法 是否显著	有序聚类法 突变点
渭河咸阳水文站	年径流量	1970、1994年	5.14	显著	1986年	5.43	显著	1985年
	年输沙量	1973、1994年	6.42	显著	1982年	7.07	显著	1973年
泾河张家山水文站	年径流量	1997年	4.86	显著	1991年	5.05	显著	1996年
	年输沙量	1997年	4.21	显著	1997年	4.21	显著	1997年

站名	水文要素	Lee-Heghinan法 $T(\alpha/2)$=1.64 统计量|T|	Lee-Heghinan法 是否显著	Lee-Heghinan法 突变点	秩和检验法 $U(\alpha/2)$=1.96 统计量|U|	秩和检验法 是否显著	秩和检验法 突变点	最终选用突变点
渭河咸阳水文站	年径流量	5.41	显著	1970年	5.21	显著	1994年	1970、1994年
	年输沙量	7.07	显著	1973年	6.12	显著	1993年	1973、1994年
泾河张家山水文站	年径流量	5.08	显著	1996年	5.21	显著	1997年	1997年
	年输沙量	4.21	显著	1997年	4.84	显著	2004年	1997年

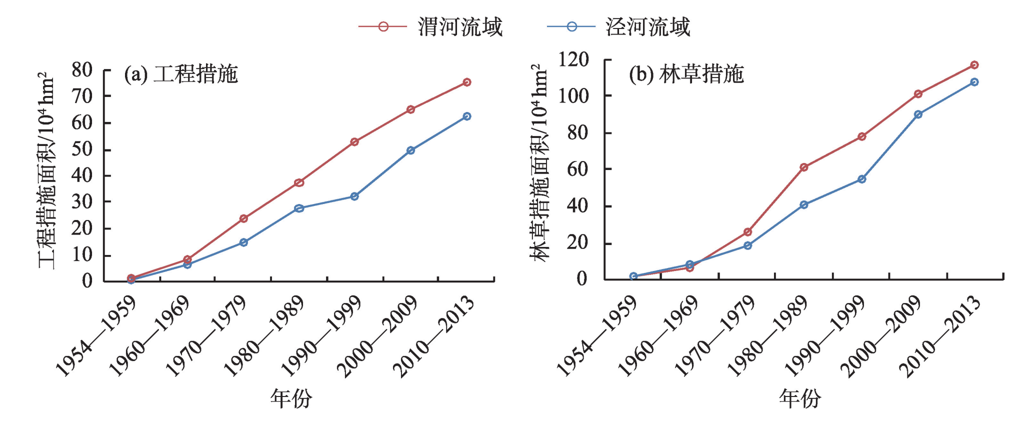


图5 渭河与泾河流域工程措施与林草措施面积

Fig. 5 Area of engineering and forest and grassland conservation measure in Wei River and Jing River Basins

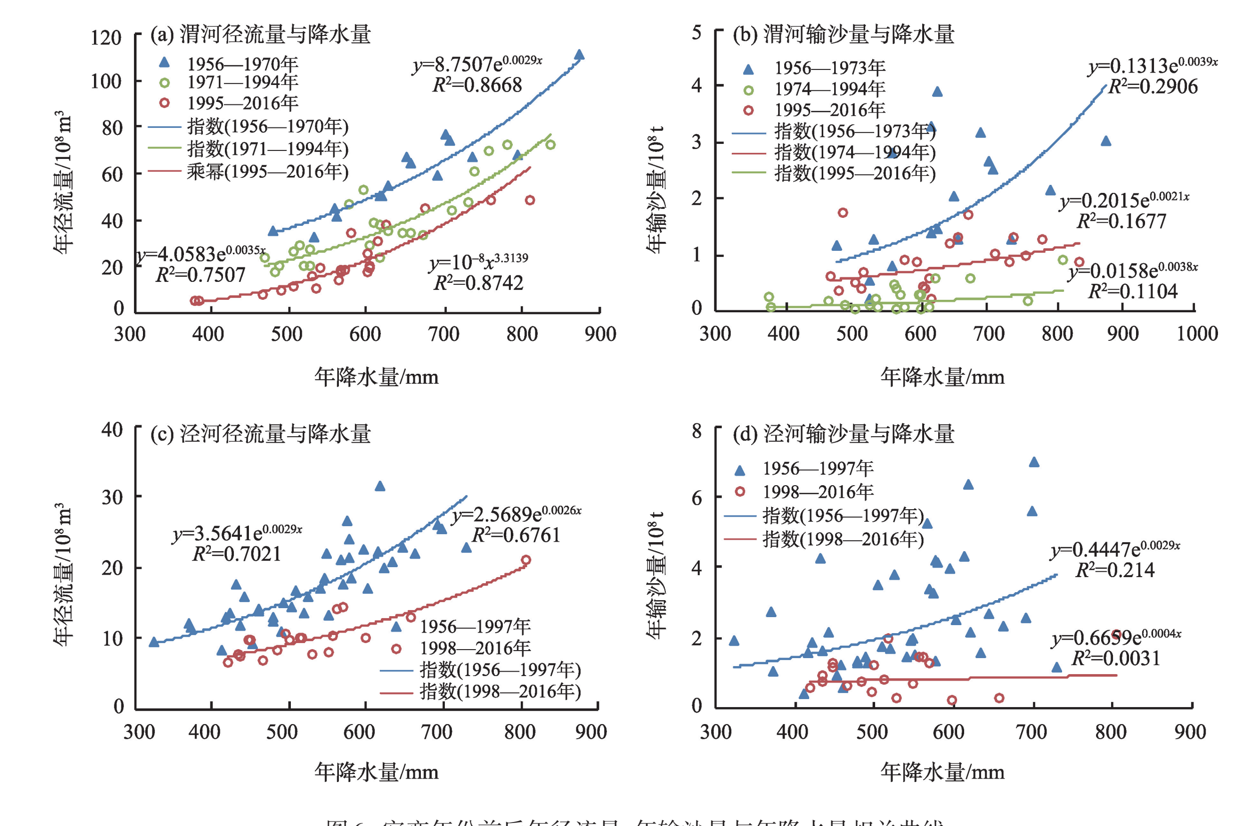


图6　突变年份前后年径流量、年输沙量与年降水量相关曲线

Fig. 6　Correlation curves between annual runoff and precipitation, annual sediment load and precipitation before and after abrupt year

表2　降水和人类活动的减水减沙效应分析

Tab. 2　Effects of runoff and sediment load reduction by precipitation and human activities

站名	时段		实测值/10^8 m^3	天然值/10^8 m^3	实测值减少量/10^8 m^3	人类活动影响减少量/10^8 m^3	人类活动的减水效应/%	降水的减水效应/%
	年径流量							
渭河咸阳水文站	基准期	1956—1970年	60.160	–	–	–	–	–
	措施期	1971—1994年	38.670	54.715	−21.490	−16.045	74.7	25.3
	措施期	1995—2016年	22.376	47.741	−37.784	−25.365	67.1	32.9
泾河张家山水文站	基准期	1956—1997年	17.427	–	–	–	–	–
	措施期	1998—2016年	10.355	17.016	−7.072	−6.661	94.2	5.8
	年输沙量							
站名	时段		实测值/10^8 t	天然值/10^8 t	实测值减少量/10^8 t	人类活动影响减少量/10^8 t	人类活动的减沙效应/%	降水的减沙效应/%
渭河咸阳水文站	基准期	1956—1973年	1.937	–	–	–	–	–
	措施期	1974—1994年	0.865	1.634	−1.072	−0.769	71.7	28.3
	措施期	1995—2016年	0.233	1.330	−1.704	−1.097	64.4	35.6
泾河张家山水文站	基准期	1956—1997年	2.556	–	–	–	–	–
	措施期	1998—2016年	0.975	2.123	−1.581	−1.148	72.6	27.4

为28.3%、35.6%。泾河张家山站实测年径流量由基准期的17.43×10^8 m^{3}减少到措施期的10.36×10^8 m^3（1998—2016年），人类活动的减水效应为94.2%，降水的减水效应为5.8%；泾河张家山站年输沙量由基准期的2.556×10^8 t减少到措施期的0.975×10^8 t（1998—2016年），人类活动的减沙效应72.6%，降水的减沙效应别为27.4%。可见渭河与泾河流域人类活动的减沙效应远大于降水的减水减沙效应，人类

表3 渭河与泾河流域水文特征值

Tab. 3 Hydrologic characteristics of the Wei River and Jing River Basins

流域	地理特征				气候特征	
	集水面积/km²	河长/km	海拔高程/m	植被覆盖率/%	气温/℃	年降水量/mm
渭河咸阳以上	46827	606.9	363~3495	70.62	9.4	609.2
泾河张家山以上	43216	397.1	363~2540	51.31	8.6	531.6
渭河/泾河	1.1	1.5	1.4	1.4	1.1	1.1

流域	径流特征			泥沙特征		
	年径流量/10^8 m³	年径流深/mm	径流系数	年输沙量/10^8 t	年输沙模数/t·km^{-2}	年均沙量/kg·m^{-3}
渭河咸阳以上	38.078	81.3	0.133	0.953	2035	25.0
泾河张家山以上	15.659	36.2	0.068	2.064	4776	132.0
渭河/泾河	2.4	2.2	2.0	0.5	0.4	0.2

活动起主导作用。

3.4 水文特征差异性分析

渭河与泾河流域的水文特征对照见表3，可以看出，2个流域的水沙特征差异性较大：渭河的年径流量、年径流深、径流系数是泾河流域的2.0~2.4倍，渭河的年输沙量、年输沙模数、年均含沙量反而仅是泾河流域的1/2~1/5。造成2个相邻流域水沙特征差异性较大的主要原因有：(1) 渭河流域降水量较多，故而产生的径流量较大；(2) 渭河流域的气温和植被覆盖度较高，约为泾河流域的1.1和1.4倍，水土流失相对较轻，产生的输沙总量和河流泥沙含量小于泾河流域；(3) 渭河流域各项水土保持措施力度均大于泾河流域(图5)，对泥沙的拦蓄作用大，截止2016年，渭河流域实施梯田70.07×10^4 hm²、林地85.46×10^4 hm²、草地33.47×10^4 hm²、坝地0.19×10^4 hm²，泾河流域实施梯田66.21×10^4 hm²、林地80.85×10^4 hm²、草地28.19×10^4 hm²、坝地0.42×10^4 hm²；(4) 水资源开发利用程度不同，2016年渭河、泾河流域天然径流量分别为41.36×10^8 m³、10.34×10^8 m³(实测径流量与社会经济耗水量之和)，社会经济用水耗水量分别为19.71×10^8 m³、3.80×10^8 m³，水资源开发利用程度分别为47.6%、36.8%，渭河的水资源开发利用程度较高，这也是渭河流域实测径流量减少趋势较泾河流域显著的主要原因之一；(5) 2个流域温度与植被覆盖度的历年变化存在差异(图7)，渭河、泾河流域气温年均升高0.023 ℃、0.026 ℃，植被覆盖度年均增加0.71%、0.79%，泾河的气温和植被覆盖度提高较快，这也是泾河流域泥沙减少比渭河流域多的重要原因。

4 讨论

(1) 泾河在西安市高陵区与渭河汇合后，二河的水量、水质特征相异，感官不同，故有“泾渭分明”的说法，早期很多人认为造成“泾渭分明”现象的原

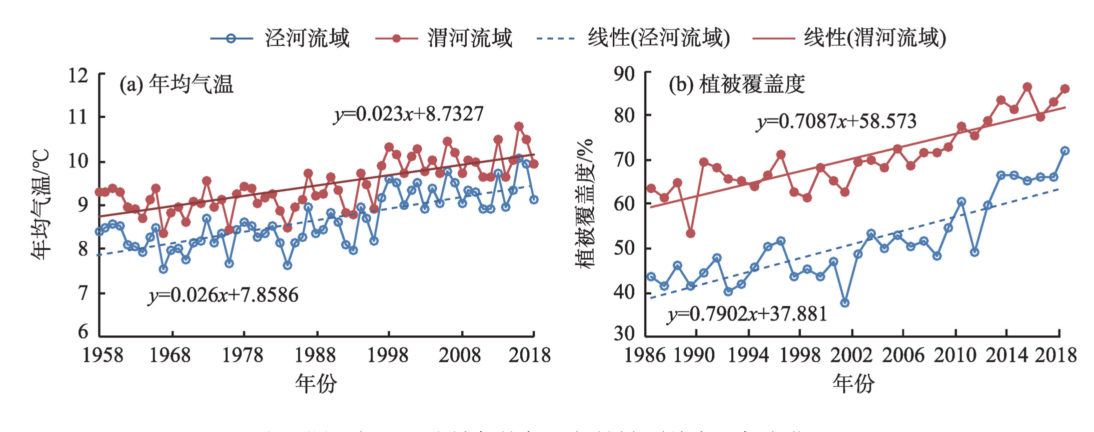


图7 渭河与泾河流域年均气温与植被覆盖度历年变化过程

Fig. 7 Changes of temperature and fractional vegetation coverage of Wei River and Jing River Basins

因是渭水浊于泾水。本文分析结果发现渭河流域的年径流量、年径流深均大于泾河流域,年输沙量、年输沙模数、年均含沙量仅是泾河流域的1/2~1/5,总体上呈现渭河水清、泾河水浊的特点。过去人们对“泾渭分明”的现象解释为“渭水浊于泾水”的说法,可能是由于渭河中上游流经区域的土壤所含矿物质成份不同,导致渭河水的颜色深于泾河水,而以平均含沙量为标准来衡量,应是“泾水浊于渭水”。

(2) 冉大川等[18]对黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应研究表明,渭河流域1997—2006年人类活动的减水、减沙作用分别占64.0%、67.2%,泾河流域1997—2006年人类活动的减水、减沙作用分别占72.0%、53.0%;本文分析得到渭河咸阳站1995—2016年人类活动减水、减沙效应为67.1%、64.4%,基本与文献研究结果一致,说明近10 a渭河流域人类活动对水沙的影响变化不大。泾河张家山站1998—2016年人类活动减水、减沙效应分别为94.2%、72.6%,人类活动的影响增大了20%左右。

(3) 渭河流域的径流系数是泾河流域的2倍,这与湿润区的径流系数大于干旱区的径流系数的地区分布规律一致。渭河流域比邻长江流域,右岸支流多发源于秦岭,降水量比泾河流域多出77.6 mm,植被覆盖度高出19.31%,在气候上渭河流域相对比泾河流域湿润,相同的降水产生的径流较多,径流系数更大。

(4) 鉴于泾河流域水土流失较为严重,特别是上游马莲河的水质较差,应进一步加大泾河流域治理,增加水平梯田、淤地坝、林草等水土保持措施。同时,建议加快推进白龙江引水工程,向平(凉)庆(阳)调水,并与引洮工程联合调度,为渭河、泾河增加生态补水,改善河流生态环境。

5 结 论

(1) 渭河、泾河流域多年平均年降水量分别为609.2 mm、531.6 mm,年径流量为38.08×10^8 m^3、15.66×10^8 m^3,年输沙量为0.953×10^8 t、2.064×10^8 t,年平均含沙量为25.0 $kg\cdot m^{-3}$、132.0 $kg\cdot m^{-3}$。历年降水量呈缓慢下降趋势,径流量、输沙量、含沙量均呈显著减少趋势。尽管泾河流域的泥沙比渭河流域减少得多,但是泾河流域泥沙仍高于渭河流域,这进一步证实了“泾渭分明”现象并不是由“渭水浊于泾水”造成。

(2) 20世纪70年代后,渭河流域水土保持措施的实施力度增大,而泾河流域水土保持措施在20世纪90年代后期才显著增加,因此渭河咸阳水文站年径流量突变年份为1970、1994年,年输沙量突变年份为1973、1994年;泾河张家山站年径流量、年输沙量突变年份较晚,均为1997年。

(3) 渭河咸阳站1971—1994年、1995—2016年人类活动的减水效应为74.7%、67.1%,降水的减水效应为25.3%、32.9%;渭河咸阳站1974—1994年、1995—2016年人类活动减沙效应为71.7%、64.4%,降水的减沙效应为28.3%、35.6%;泾河张家山站1998—2016年人类活动减水、减沙效应分别为94.2%、72.6%,降水的减水、减沙效应分别为5.8%、27.4%。

(4) 2个流域的水沙特征差异性较大,渭河的年径流量、年径流深、径流系数是泾河流域的2.0~2.4倍,渭河的年输沙量、年输沙模数、年均含沙量仅是泾河流域的1/2~1/5。2个相邻流域水沙特征差异性较大的主要原因是,流域气温、降水等气候条件不同,集水面积、植被覆盖度等下垫面条件存在差异,水利水保措施、水资源开发利用程度等人类活动的影响所致。

参考文献(References)

[1] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. 人民黄河. 2019, 41(11): 1-6. [Zuo Qiting. The framework for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2019, 41(11): 1-6.]

[2] 严宇红, 黄维东, 吴锦奎, 等. 疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 47-55. [Yan Yuhong, Huang Weidong, Wu Jinkui, et al. Study on the law of sediment distribution and the relationship between water and sand in the Dredging River Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 47-55.]

[3] 姚文艺, 焦鹏. 黄河水沙变化及研究展望[J]. 中国水土保持, 2016(9): 55-63, 93. [Yao Wenyi, Jiao Peng. Changes and research prospects of the Yellow River sediment[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016(9): 55-63, 93.]

[4] 牛赟, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山大野口流域气温、降水、河川径流特征分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 931-938. [Niu Yun, Liu Xiande, Jing Wenmao, et al. Feature analysis of temperature and precipitation and river runoff at Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 931-938.]

[5] 姚海芳, 师长兴, 顾畛逵. 气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 472-479. [Yao Haifang, Shi Changxing, Gu Zhenkui. Impacts of climate change and human activities on water discharge and sediment load of ten tributaries (the Ten Kongdui) of the upper Yellow River [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3): 472-479.]

[6] Chang J, Wang Y, Istanbulluoglu E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China[J]. Quaternary International, 2015, 380-381:169-179.

[7] 孙悦, 李栋梁, 朱拥军, 等. 渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 169-178. [Sun Yue, Li Dongliang, Zhu Yongjun, et al. Advances in the study of the changes in the runoff of the Wei River and its response to climate change and human activities[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 169-178.]

[8] 冯星, 郭建青, 孙东永, 等. 近55 a渭河流域气候变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 718-725. [Feng Xing, Guo Jianqing, Sun Dongyong, et al. Climate change characteristics in Weihe River Basin from 1960 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 718-725.]

[9] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 冰川冻土, 2012, 32(2): 73-83. [Niu Zuirong, Zhao Wenzhi, Liu Jinqi, et al. Study on the characteristics and trends of temperature, precipitation and runoff changes in the Wei River Basin in Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 32(2): 73-83.]

[10] 吴小宏, 刘招, 李强, 等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144-149. [Wu Xiaohong, Liu Zhao, Li Qiang, et al. Study on the law and attribution of the change of water and sand in the long series of the Wei River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 144-149.]

[11] 郑培龙, 李云霞, 赵阳, 等. 黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 20-24. [Zheng Peilong, Li Yunxia, Zhao Yang, et al. Effect of climate variation and land use change on runoff in Jinhe Basin of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 20-24.]

[12] 胡安焱, 刘燕, 郭生练, 等. 渭河流域水沙多年变化及趋势分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 39-41. [Hu Anyan, Liu Yan, Guo Shenglian, et al. Multi-year changes and trend analysis of water and sand in the Wei River Basin[J]. Yellow River, 2007, 29(2): 39-41.]

[13] 徐瑞瑞, 高鹏, 穆兴民, 等. 渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应[J]. 人民黄河, 2020, 42(3): 17-24. [Xu Ruirui, Gao Peng, Mu Xingmin, et al. The time-space change of water and sand in the Wei River Basin and its response to human activities[J]. Yellow River, 2020, 42(3): 17-24.]

[14] Kumar L, Mutanga O. Google Earth engine applications since inception: Usage, trends, and potential[J]. Remote Sensing, 2018, 10 (10): 1-15.

[15] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015[J]. Scientific Data, 2018, 5: 170191, doi: 10.1038/sdata.2017.191.

[16] USGS. Landsat surface reflectance data[JEB/OL]. [2020-04-14]. https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-surface-reflectance.

[17] Searcy J K, Hardison C H. Double-mass curves[M]. US: Geological Survey Water Supply, 1960.

[18] 冉大川, 左仲国, 吴永红, 等. 黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Ran Dachuan, Zuo Zhongguo, Wu Yonghong, et al. Response to human activities by recent changes in water sand in the middle of the Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 2012.]

Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins

HUANG Chenlu, YANG Qinke
(College of Urban and Environment Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Based on hydrological data, water conservancy and conservation statistical data, annual average temperatures, and Landsat surface reflectance data from 1956 to 2016 in the Wei (upper Xianyang Hydrological Station on the main stream of the Wei River) and Jing (upper Zhangjiashan Hydrological Station) River Basins, northwest China, historical changes in the hydrological elements, temperature, and vegetation in the basins were analyzed. Mathematical statistical methods, such as double cumulative values, correlation curve method, cumulative anomaly method, ordered clustering method, Lee-Heghinan method, and rank sum test method, were used to determine the abrupt year of annual runoff and annual sediment load and the effect of precipitation and human activities on runoff and sediment reduction. The results show that (1) precipitation, runoff, sediment load, and sediment concentration in the Wei and Jing River Basins decreased significantly from 1956 to 2016. Specifically, annual precipitation in the Wei and Jing River Basins decreased by 1.41 $mm \cdot a^{-1}$and 0.85 $mm \cdot a^{-1}$, annual runoff decreased by 0.711×10^{8} $m^{3}\cdot a^{-1}$ and 0.217×10^{8} $m^{3}\cdot a^{-1}$, annual sediment load decreased by 0.037 $t\cdot a^{-1}$ and 0.042×10^{8} $t\cdot a^{-1}$, and annual average sediment concentration decreased by 0. 586 $kg\cdot m^{-3}\cdot a^{-1}$ and 0. 905 $kg\cdot m^{-3}\cdot a^{-1}$, respectively precipitation and runoff in the Wei River Basin was reduced about 2 to 3 times more than the Jing River Basin, and sediment load was reduced in the Jing River Basin was reduced by 1.1 to 1.5 times more than the Wei River Basin. (2) The measured annual runoff at Xianyang Station on the Wei River decreased from 60.16×10^{8} m^{3} in the baseline period (1956—1970) to 38.67×10^{8} m^{3} (1971—1994) and 22.38×10^{8} m^{3} (1995—2016). Additionally, during the two latter time periods, the runoff reduction effects due to human activity was 74.7% and 67.1%, respectively, and the runoff reduction effects of precipitation were 25.3% and 32.9%, respectively. The annual sediment load at Xianyang Station decreased from 1.937×10^{8} t in the baseline period (1956—1973) to 0.865×10^{8} t (1974—1994) and 0.233×10^{8} t (1995—2016). The sediment reduction effects due to human activity in the two study periods were 71.7% and 64.4%, respectively, and the sediment reduction effects due to precipitation were 28.3% and 35.6%, respectively. The measured annual runoff and the annual sediment load of the Zhangjiashan Station on the Jing River decreased from 17.43×10^{8} m^{3} and 2.556×10^{8} t in the baseline period (1956—1997) to 10.36×10^{8} m^{3} and 0.975×10^{8} t in the treatment period (1998—2016). The impact of human activity on runoff and sediment reduction was 94.2% and 72.6%, respectively, and the impact of precipitation on runoff and sediment reduction was 5.8% and 27.4%, respectively. (3) The runoff and sediment characteristics of the two river basins were quite different. The annual runoff, annual runoff depth, and runoff coefficient of the Wei River Basin were 2.0 to 2.4 times higher than those of the Jing River Basin. The annual sediment load, annual sediment transport modulus, and annual average sediment concentration in the Wei River Basin was only 1/2−1/5 of that in the Jing River Basin. The main reasons for these large differences in runoff and sediment characteristics between these two adjacent river basins are attributed to differences in climatic conditions (temperature and precipitation) between the river basins, and differences in vegetation coverage, and human activity such as soil and water conservation measures undertaken. The analysis of the differences in runoff and sediment between Wei and Jing River Basins clarifies the explanation people mistakenly believe that the phenomenon of a "distinct Jing and Wei" is because "Wei water is more turbid than Jing water".

Key words: runoff; sediment; the reduction effect of runoff and sediment; Wei River Basin; Jing River Basin